高能率・高音質システムを目指す

小型スピーカーの設計と製作 第46回

小澤隆久 OZAWA Takahisa

バスレフ型エンクロージャーでは，吸音材の調整によって低音域の量と質をコントロールすることが重要だ．またフルレンジスピーカーでは，バッフルステップによる低音域の音圧減少を補正することで，どんなジャンルの音楽も良い音で再生できるようになる．前回製作したFF225WK用96リットルバスレフ型エンクロージャーと，FF125WK＋BF125WKを使って，それらの調整を試みた．

FF225WK用96リットルバスレフ型

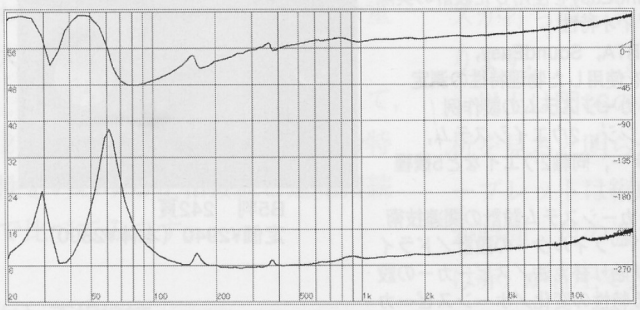
吸音材の調整

バスレフ型のダクトからは，必要な共振周波数を中心とした低音のほかにも，エンクロージャー内部の定在波やダクトの長さによる共振音がかなりのレベルで漏れています．そして，それらの情報は，インピーダンス特性やニアフィールドでの音圧周波数特性を調べることで，簡単に得ることができます．初めに，前回製作した状態で測定しました．

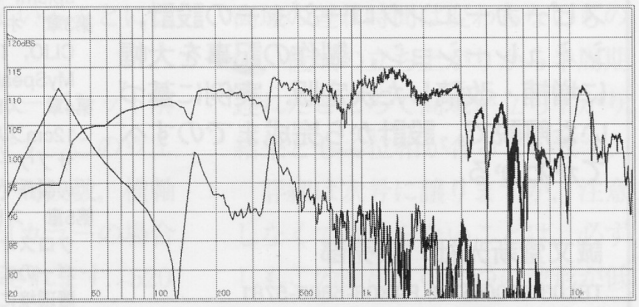
インピーダンス特性（**図1**）からダクトの共振周波数は36Hzと読み取れます．一番低域側の2つの山の間の谷の部分の周波数で，位相特性が0°の位置になります．設計では40Hzの予定だったので，若干低くなりました．そのほかに，160Hzと375Hzに共振峰があります．それらの共振を発生させる長さ〔m〕は，音速〔m/s〕÷共振周波数〔Hz〕の2倍で求められるので，106cmと45cmです．エンクロージャーの高さと奥行きよりも少し長い値ですが，すでに吸音材が入れてある影響だと思います．また，900Hzと11.5kHzにもなだらかな共振峰がありますが，これらはエッジの逆共振と高域共振によるものです．

ダクトの開口とユニットのニアフィールド音圧周波数特性（**図2**）は，バッフル面から5mmの距離で，それらの中心位置にマイクをおいて測定したものです．ニアフィールドで測定したデータを比較するときには，音源の面積の違いを補正する必要があり，ユニットの音圧を基準にしてダクトの音圧を補正してあります．ダクトの開口部の特性では，ダクトの共振周波数（36Hz）と定在波の共振周波数（160Hzと375Hz）に一致して，音圧特性に山ができています．それに対してユニットの特性では，その3か所の共振周波数で谷状になっています．

特にダクトのニアフィールド特性は，定在波の影響が一番わかりやすく，測定も簡単なのでお勧め



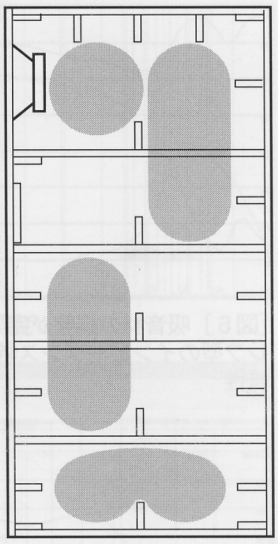
［図1］FF225WK用96リットルバスレフ型のインピーダンス特性（入力500mV）．上線はその位相特性



［図2］ダクトの開口とFF225WKのニアフィールド音圧周波数特性（入力500mV/1V換算値）．

[写真1] 図1，2の場合の吸音材

[写真2] エンクロージャーに充填するように使うのに便利な吸音材



[図3] 吸音材として使ったろ過ウールの充填場所

です．この特性を見ながら，2つの定在波を小さくする吸音材の使い方を調べました．

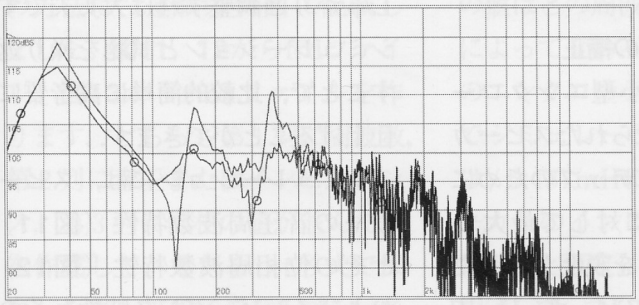
現在の吸音材は，**写真1**のようになっています．天板，裏板とバッフル板の下部に木工用接着剤で粗毛フェルトを貼り付け，両側板にも13cm角の粗毛フェルトが10枚ずつ貼ってあります．フェルトを貼りこんでも定在波の防止にはあまり役に立ちませんが，板の鳴きを抑えることができます．底にはろ過ウール1袋（**写真2**左）をふんわりと充填してあります．定在波の防止には，この充填方法がベストなように感じているので入れたのですが，足りなかったようです．そこで，さらに3袋を**図3**のように充填しました．

すると低音域の音圧が2～4dB減少したものの，2か所の定在波を見事に抑えることができました（**図4**）．群遅延特性も良くなっています（**図5**）．インピーダンス特性の共振峰（160Hzと375Hz）もなくなりました（**図6**）．ユニットのニアフィールド音圧周波数特性の低音域も滑らかになっています（**図7**）．

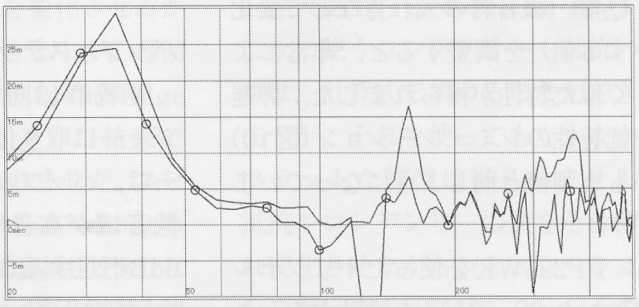
以上のように，吸音材の充填方法は定在波の防止に非常に効果的ですが，入れすぎるとエンクロージャー内部の吸音材の密度が大きくなりすぎ，ダクトの効果がなくなってしまいます．吸音材として使うものの密度や材質に注意し，充填する場所は測定や試聴を繰り返して調整しましょう．

低音域が設計の通りに出ているのかを調べるのにも，ニアフィールド音圧周波数特性を使います．実際の低音域を測定するには，ユニットとダクトの位置にもよりますが，ある程度測定距離をとる必要があります．しかし，その状態では部屋の定在波の影響で，かなり凸凹のある特性しか得られず，わかりにくいものです．そこで，ユニットとダクトが同じ位置にあるものとして，それらのニアフィールド特性を足し算したもので評価します．

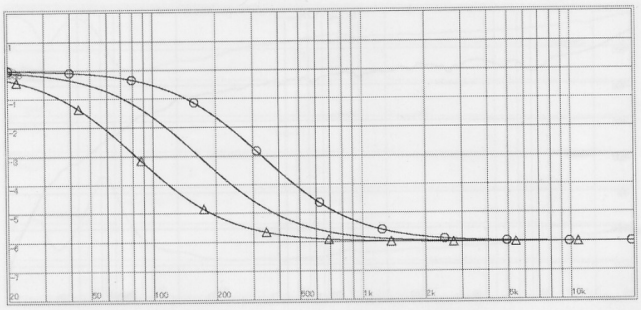
図8がその特性ですが，シミュレーションの結果（**図9**）と見比べやすいように周波数範囲を10Hz～1kHzにしてあります．連載第44回図20のシミュレーションとの違いは，**図8**の測定アンプが半導体式で出力インピーダンスを無視できるため，Q_{ts}の値を0.7はなく連載第42回の表1の実測値0.479にしたことと，ダクトの共振周波



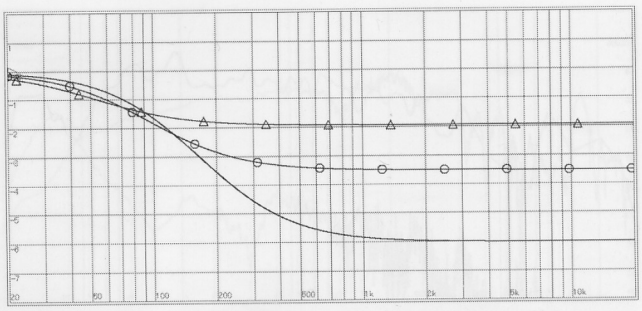
[図4] ダクトの開口部の音圧周波数特性（入力500mV/1V換算値）．丸印が吸音材を追加した場合



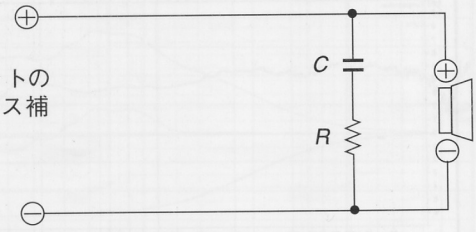
[図5] 図4のときの群遅延特性



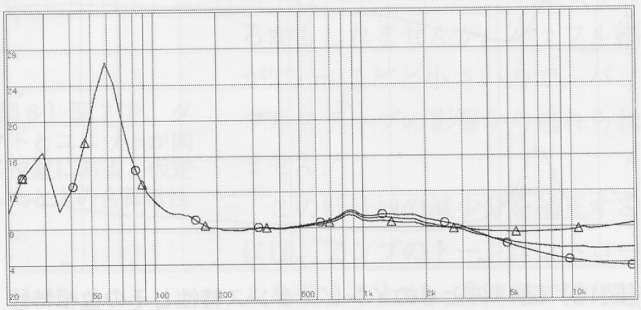
[図16] 抵抗を8Ωに固定しコイルの値を変化させたときの特性．コイルの値は，5.437mH（無印），2.7185mH（丸印），10.874mH（三角印）



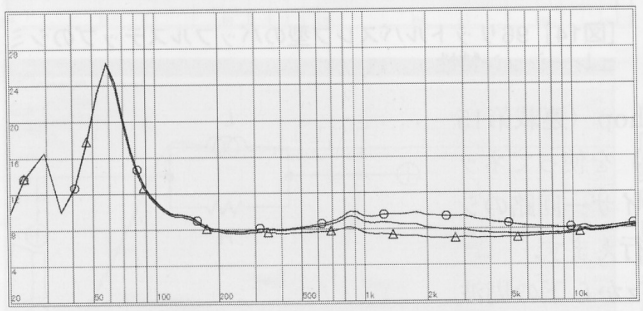
[図17] コイルを5.437mHに固定し抵抗の値を変化させたときの特性．抵抗の値は，8Ω（無印），4Ω（丸印），2Ω（三角印）



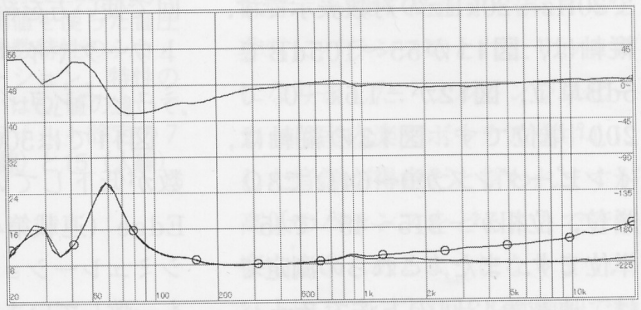
[図18] ユニットのインピーダンス補正回路



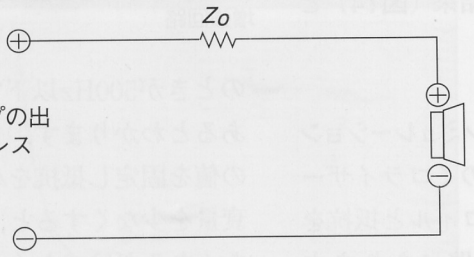
[図19] コンデンサーを4.35μFに固定し抵抗の値を変化させたときの特性．抵抗の値は，8Ω（無印），4Ω（丸印），16Ω（三角印）



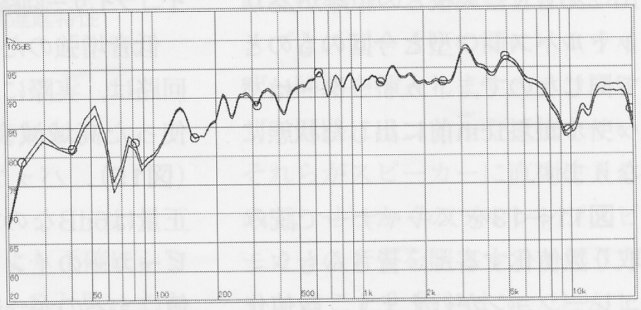
[図20] 抵抗を16Ωに固定しコンデンサーの値を変化させたときの特性．コンデンサーの値は，4.35μF（無印），2.175μF（丸印），8.7μF（三角印）



[図21] 3.3μFと18Ωで補正したときのインピーダンス特性とその位相特性．丸印は補正なし



[図22] アンプの出力インピーダンス

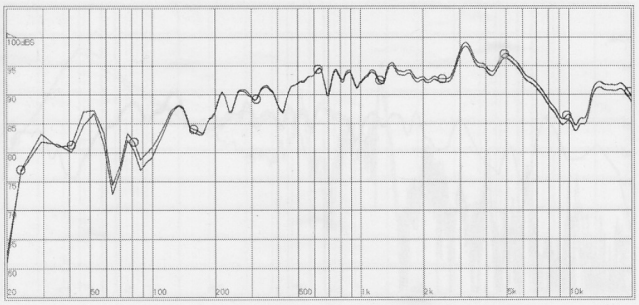


[図23] アンプの出力インピーダンスが3.8Ω（丸印）の場合の音圧周波数特性のシミュレーション．無印は出力インピーダンス0Ω

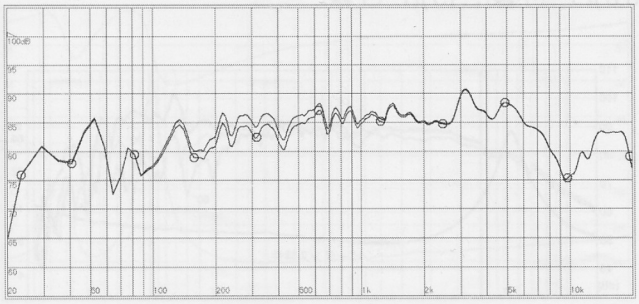
18Ωの組み合わせが良さそうです（**図21**）．

ここで，アンプの出力インピーダンス（**図22**）がスピーカーの音圧周波数特性にどのくらい影響しているのか，シミュレーション（**図23**）と実際に測定したデータ（**図24**）を比較してみました．なんと，まったく一致しています．このことから，SV-2A3の出力インピーダンスを3.8Ωの純抵抗とみなしても大丈夫なことが確認できました．

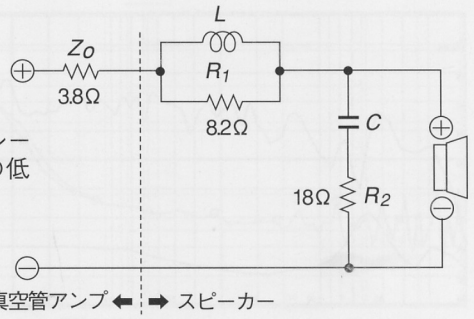
最終的なシミュレーション回路は，**図25**のようになります．このスピーカーはSV-2A3でドライブすることを前提にしているので，アンプの出力インピーダンス分の抵抗を回路に含めて考えます．出力インピーダンスの小さいアンプの場合には，回路図のZ_oは必要ありません．コイルの値を変えてシミュレーションしました(**図26**)．バッフルステップを完全に補正するには5.4mHのコイルのほうが良



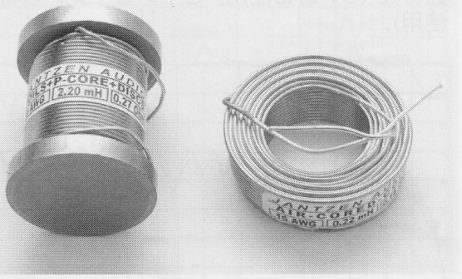
[図24] アンプを変えて実測した音圧周波数特性．PMA-390SE（無印）とSV-2A3（丸印）



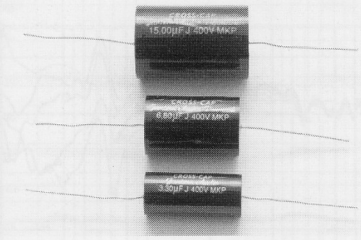
[図26] 図25でコンデンサーに3.3μFを使い，コイルの値を変化させたときの音圧周波数特性．コイルの値は，2.2mH（無印）と5.4mH（丸印）



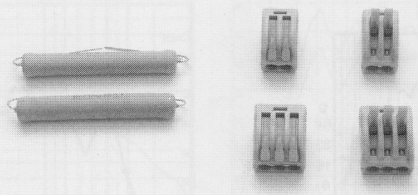
[図25] シミュレーションのための低音域増強回路



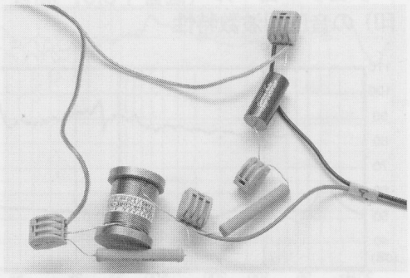
[写真3] JANTZEN AUDIOのコア入りコイル（左）と空芯コイル（右）



[写真4] JANTZEN AUDIOのフィルムコンデンサーCROSS CAP



[写真5] 六本木工学研究所の抵抗（左）とワンタッチ結線端子



[写真6] 測定・試聴用に組んだ低音増強回路．実際の回路には図25のZ_oは組み込まない

いのでしょうが，少しでも能率を犠牲にしたくないので，コイルは2.2mHにしました．また，このほうが中音域もフラットになるようです．

測定と試聴

コア入りコイルとコンデンサーにはJANTZEN AUDIOのものを使用しました（**写真3**，**4**）．どちらも高級スピーカーに使われていますが，購入しやすい価格帯です．また，抵抗にはRITブランドの10Wタイプ（**写真5**左）を使いましたが，ユニットの限界までパワーを入れたい場合にはもっと耐圧の大きなものが必要になると思います．それぞれのパーツの接続は，試聴による調整が済むまでワンタッチ結線用のパーツ（**写真5**右）が便利です．これらを使ってショートに注意して配線します（**写真6**）．

再生周波数範囲は40Hz～20kHz（±6dB）と非常にワイドになりました（**図27**）．また，インピーダンス特性は，200～900Hzで上昇していきます．コイルを大きくするとこの上昇率が大きくなり，SV-2A3の出力インピーダンスとの兼ね合いで，周波数特性も上昇してしまいます．それが**図26**に表れているのです．

試聴したところ，このままでは少し高音域に強調感を感じました．そこで，インピーダンス補正用コンデンサーの値を変えてみました（**図28**）．15μFにすると少しおとなしすぎる感じになり，6.8μFでバランスがとれているようです．500Hz～3kHzの範囲で1dBずつの違いですが，音質は非常に大きく変化するので，じっくりと試聴して決定したいと思います．トーンコントロールで調整した音のバランスに非常に近い特性が得られました（**図29**）．

メーカー推薦の28リットルバスレフ型と今回の96リットルバスレフ型で高低の音のバランスを調整した場合，その周波数特性に大きな違いは出ません．しかし，低音の質がまったく違います．SV-